

# АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

## АСТРОФИЗИКА

ТОМ 16

НОЯБРЬ, 1980

ВЫПУСК 4

УДК 524.527

### ОБ ОХЛАЖДЕНИИ ПЛОТНЫХ МЕЖЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКОВ МОЛЕКУЛАМИ ОКИСИ УГЛЕРОДА

А. Н. АРШУТКИН, И. Г. КОЛЕСНИК

Поступила 19 октября 1979

Принята к печати 14 июля 1980

Получена простая расчетная формула скорости охлаждения плотных межзвездных облаков молекулами CO. Проведено сравнение с охлаждением пылевыми частицами. Найдено, что межзвездная пыль становится преобладающим источником охлаждения при  $n \geq 10^4 \text{ см}^{-3}$ .

Молекулы CO широко распространены в межзвездной среде. В настоящее время анализ радиоизлучения молекул окиси углерода позволяет сделать важные выводы о распределении межзвездного газа в Галактике и физических условиях в массивных газо-пылевых комплексах, являющихся центрами активного звездообразования (см., например, [1, 2]). Но молекулы окиси углерода важны не только как хороший индикатор физических характеристик межзвездных облаков. При низких температурах они становятся основным источником охлаждения межзвездного газа, поэтому необходимо учитывать вклад молекул CO в энергетику газа при исследованиях структуры и динамики межзвездных облаков. В связи с этим удобно иметь простые расчетные формулы для скорости охлаждения молекулами CO. Этому вопросу посвящена данная работа.

Отвод энергии молекулами CO осуществляется линейчатым излучением в миллиметровом диапазоне при спонтанных переходах между вращательными состояниями  $J \rightarrow J-1$ . Возбуждение молекулы определяется столкновениями с H, H<sub>2</sub>, He. В общем виде для скорости охлаждения единицы объема газа имеем формулу

$$\Lambda(\text{CO}) = \sum_{J=1}^{\infty} n_J A_{J, J-1} \Delta E_{J, J-1} L(\tau_{J, J-1}) \text{ эрг см}^{-3} \text{ с}^{-1}. \quad (1)$$

Здесь  $n_j$  — населенность  $J$ -го вращательного уровня;  $A_{J, J-1} = 2.236 \cdot 10^{-7} J^2 / (2J + 1) \text{ с}^{-1}$  — вероятность спонтанного перехода;  $\Delta E_{J, J-1} = 7.64 \cdot 10^{-16} J \text{ эрг}$  — энергия перехода,  $L(\tau)$  — функция, учитывающая вероятность того, что квант с длиной волны  $\lambda_{J, J-1}$  свободно покинет облако с оптической глубины  $\tau$ . Величина  $L(\tau)$  делает формулу (1) нелокальной. Скорость охлаждения становится зависящей от распределений плотности и температуры в облаке, поля скоростей и других характеристик, способных повлиять на распространение излучения в облаке.

В предположении, что контур молекулярных линий доплеровский и происходит полное перераспределение излучения по частотам, для функции  $L(\tau)$  можно воспользоваться результатами расчетов В. В. Иванова и В. Т. Щербакова [3], выполнивших табулирование  $L(\tau)$  для  $\tau \leq 100$ . Для больших оптических глубин имеем асимптотику

$$L(\tau) = \frac{1}{\tau \sqrt{\pi \ln \tau}} \left( \frac{1}{2} - \frac{0.26930}{\ln \tau} + \dots \right). \quad (2)$$

Наибольшие трудности при вычислении скорости охлаждения по формуле (1) связаны с определением населенностей вращательных уровней  $n_j$  молекулы. Для этого необходимо решать систему уравнений стационарности с учетом столкновительных и излучательных переходов между уровнями, что требует знания сечений соответствующих элементарных процессов. Такие расчеты для условий, характерных для плотных межзвездных облаков, проводились в работах [4—7]. Они показали что в этих условиях у молекулы СО нижние вращательные уровни, до некоторого  $J_{\max}$  полностью заселены, а для  $J > J_{\max}$  населенности пренебрежимо малы. Например, согласно Накано [4], при переходе через  $J_{\max}$  населенность скачком уменьшается более чем в  $10^2$  раз.

Очевидно, величина  $J_{\max}$  показывает, до какого вращательного уровня при данной температуре  $T$  столкновения могут обеспечить возбуждение молекулы СО. При этом величины  $n_j$  для  $J \leq J_{\max}$  приближаются к больцмановским в условиях, когда число частиц газа в единице объема  $n_p \leq 100 \text{ см}^{-3}$ , а также при больших плотностях ( $n_p \geq 10^3 \text{ см}^{-3}$ ). Но для  $n_p \sim 10^3 - 10^4 \text{ см}^{-3}$  населенности вращательных уровней могут заметно отличаться от больцмановских [6].

Однако при расчете скорости охлаждения молекулами СО нет необходимости точно учитывать вклад каждой линии отдельно, нужно знать суммарную скорость охлаждения. Поэтому при построении расчетной формулы скорости охлаждения принималось, что для  $J \leq J_{\max}$   $n_j$  определяется формулой Больцмана, а при  $J > J_{\max}$   $n_j = 0$ . После этого

основная проблема сводится к определению зависимости  $J_{\max}$  от температуры.

На основе данных о скоростях столкновительных возбуждений, приведенных в работе [8], а также на основе сравнения рассчитанных функций охлаждения молекулами CO в условиях плотных межзвездных облаков с результатами Леунга [5], Накано [4], Голдсмита и Лангерз [7] было установлено, что величина  $J_{\max}$  определяется неравенством

$$T + \Delta T_{1,0} \leq \Delta T_{J, J-1} < T + \Delta T_{2,1}, \quad (3)$$

где  $\Delta T_{J, J-1} = \Delta E_{J, J-1}/k = 5.536 \cdot J$  К.

Используя (3), получаем

$$J_{\max} = \begin{cases} \text{ent}(T/5.536) + 2, & \text{если } T/5.536 \text{ -- нецелое,} \\ T/5.536 + 1, & \text{если } T/5.536 \text{ -- целое.} \end{cases} \quad (4)$$

Теперь, учитывая, что для  $J \leq J_{\max}$   $n_J$  определяется формулой Больцмана, для скорости охлаждения молекулами CO на основании (1) находим

$$\Lambda(\text{CO}) = 1.708 \cdot 10^{-20} n(\text{CO}) \frac{\sum_{J=1}^{J_{\max}} J^5 \exp(-E_J/kT) L(\tau_{J, J-1})}{\sum_{J=0}^{J_{\max}} (2J+1) \exp(-E_J/kT)} \text{ эрг см}^{-3} \text{ с}^{-1}. \quad (5)$$

Здесь  $n(\text{CO})$  — концентрация молекул CO,  $E_J = 3.82 \cdot 10^{-16} J(J+1)$  эрг — энергия  $J$ -го уровня. Следует подчеркнуть, что неравенство (3) справедливо в условиях плотных межзвездных облаков, когда  $n_p > 100 \text{ см}^{-3}$ .

На основании (5) для параметров  $n(\text{CO})/n(\text{H}_2) = 2 \cdot 10^{-5}$ ,  $n(\text{H}_2) = 10^3 \text{ см}^{-3}$ ,  $\Delta v/v = 10^{-5}$  и  $N_{\text{H}_2} = 10^{22} \text{ см}^{-2}$  при  $T = 7$  К и 20 К находим  $\Lambda(7 \text{ К}) = 5.8 \cdot 10^{-26} \text{ эрг см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  и  $\Lambda(20 \text{ К}) = 4.6 \cdot 10^{-25} \text{ эрг см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ , что хорошо согласуется с результатами Накано [4], получившего соответственно  $5.2 \cdot 10^{-26}$  и  $4.8 \cdot 10^{-25} \text{ эрг см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ . В работе Леунга [5] при вычислении скорости охлаждения молекулами CO решались уравнения стационарности для  $n_J$  и рассматривался перенос излучения в линиях. Было получено, что при  $T = 40$  К,  $n(\text{CO})/n(\text{H}_2) = 4 \cdot 10^{-5}$ ,  $n(\text{H}_2) = 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ ,  $R = 2.5$  пс,  $\Delta v/v = 10^{-5}$  скорость охлаждения равна  $\sim 1 \cdot 10^{-22} \text{ эрг см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ . При таких же параметрах формула (5) дает  $\Lambda \sim 1.3 \cdot 10^{-27} \text{ эрг см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

Итак, формула (5) с учетом (4) и выражения для  $L(\tau)$  достаточно точно представляет скорость охлаждения молекулами окиси углерода. Возможные отклонения  $n_J$  от равновесных значений мало влияют на сум-

марную величину охлаждения, а основную роль играет количество возбуждаемых уровней. Иными словами, в условиях плотных межзвездных облаков скорость охлаждения в расчете на 1 г определяется главным образом температурой среды; зависимость от плотности появляется только вследствие поглощения излучения по пути выхода из облака, которая учитывается множителем  $L(\tau)$ .

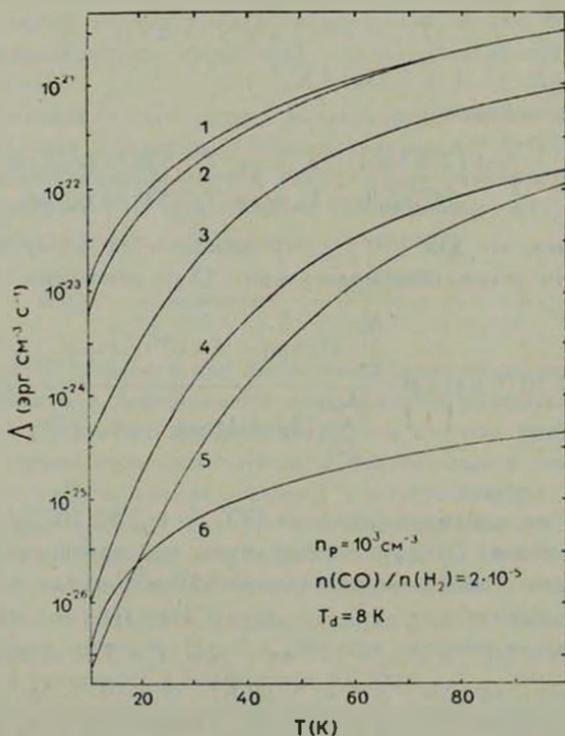


Рис. 1. Скорости охлаждения молекулами CO (кривые 1—5) и межзвездными пылинками (кривая 6) в зависимости от температуры газа  $T$  (K) при  $n_p = 10^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $n(\text{CO})/n(\text{H}_2) = 2 \cdot 10^{-5}$ ,  $T_d = 8 \text{ K}$ : 1 — без учета поглощения излучения в линиях; 2 —  $N_p = 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ; 3 —  $N_p = 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ ; 4 —  $N_p = 3 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ ; 5 —  $N_p = 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ .

С учетом формул (4), (5) были рассчитаны скорости охлаждения молекулами CO в зависимости от  $T$  для набора плотностей на луче зрения  $N_p$  при  $n(\text{CO})/n(\text{H}_2) = 2 \cdot 10^{-5}$ ,  $n(\text{H}_2) = 10^3 \text{ cm}^{-3}$  (рис. 1) и в зависимости от плотности при фиксированной  $T = 20 \text{ K}$  (рис. 2). В расчетах не учитывалось уширение линий крупномасштабными движениями. Для

сравнения также приведена кривая охлаждения межзвездными пылинками с температурой  $T_d = 8$  К. Функция охлаждения пылинками рассмотрена в работе [9]. Из рисунков видно, что при  $N_p \leq 10^{21}$  см $^{-2}$  в широком диапазоне температур молекулы окиси углерода охлаждают газ эффек-

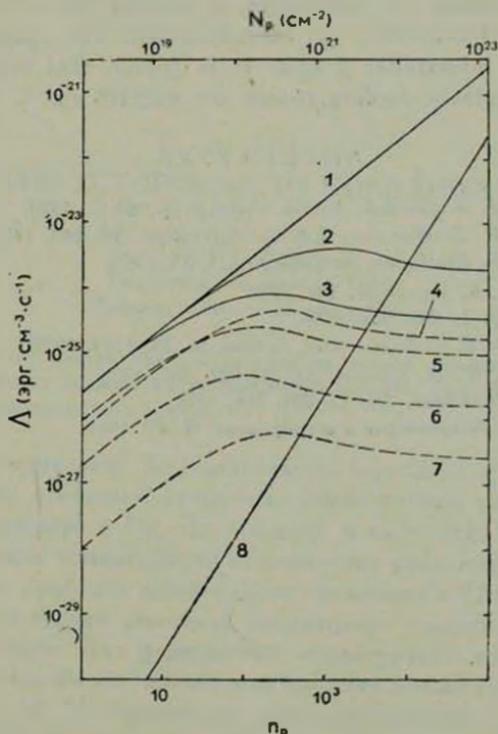


Рис. 2. Скорости охлаждения молекулами СО и межзвездными пылинками в зависимости от плотности газа  $n_p$  при  $T = 20$  К,  $n(\text{CO})/n(\text{H}_2) = 2 \cdot 10^{-5}$ ,  $T_d = 10$  К: 1—скорость охлаждения СО без учета поглощения в линиях; 2—на глубине  $R = 0.1$  пс от поверхности облака; 3—на глубине  $R = 0.5$  пс; 4—7—скорости охлаждения отдельными линиями при переходах  $J \rightarrow J-1$  соответственно: 5—4,4—3,2—1,1—0; 8—скорость охлаждения пылинками. Шкала  $N_p$  соответствует  $R = 0.5$  пс.

тивнее пылинок. Рис. 2 показывает, что охлаждение на пыли преобладает над охлаждением на СО при  $n_p \geq 10^4$  см $^{-3}$ , а если излучение молекулами СО не поглощается внутри облака, охлаждение пылинками становится преобладающим только при  $n_p \geq 10^6$  см $^{-3}$ .

Благодарим Д. А. Варшавовича и В. К. Херсонского за полезные обсуждения и ценные замечания.

Главная астрономическая  
обсерватория АН УССР

ON COOLING OF DENSE INTERSTELLAR  
CLOUDS BY CARBON MONOXIDE

L. N. ARSHUTKIN, I. G. KOLESNIK

A simple formula for calculation of cooling rate of dense interstellar clouds by CO molecules has been obtained. The comparison is made with cooling by interstellar grains. It is found that interstellar grains become a predominant cooling source for  $n \geq 10^4 \text{ cm}^{-3}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. *W. B. Burton, M. A. Gordon, Astron. Astrophys.*, 63, 7, 1978.
2. *N. Z. Scoville, P. G. Wannier, Astron. Astrophys.*, 76, 140, 1979.
3. *В. В. Иванов, В. Т. Щербаков, Астрофизика*, 1, 31, 1965.
4. *T. Nakano, P. A. S. Jaran*, 26, 189, 1974.
5. *C. M. Leung, Ap. J.*, 208, 732, 1976.
6. *Д. А. Варшавский, В. К. Херсонский, Астрон. ж.*, 55, 1169, 1978.
7. *P. F. Goldsmith, W. D. Langer, Ap. J.*, 222, 881, 1978.
8. *Sh. Green, P. Thaddeus, Ap. J.*, 205, 766, 1976.
9. *Л. Н. Аршуткин, Астрометрия и астрофизика*, 41, 29, 1980.